

BESCHLEUNIGTE PROZESSKETTEN FÜR DIE HERSTELLUNG VON CFK-SPANTEN IN HOHER STÜCKZAHL

H. Purol (Universität Bremen, Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen),
A. Stieglitz (Faserinstitut Bremen e.V., Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen),
P. Woizeschke (Universität Bremen, Fachgebiet 10, Badgasteinerstr. 1, 28359 Bremen),
Axel S. Herrmann (Composite Technology Center GmbH, Airbus-Straße 2, 21684 Stade)

Zusammenfassung

Zukünftige Flugzeugprogramme, die einen großen Anteil von Primärstrukturen aus Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) haben werden, erfordern CFK-Spante in einer Größenordnung von mehreren hundert Kilometern pro Jahr. Während für metallische Profile bereits automatisierte Fertigungsverfahren etabliert sind, werden CFK-Profile, insbesondere wenn sie gekrümmt sind oder Querschnittsänderungen aufweisen, noch manuell gefertigt. Der Vortrag zeigt eine Prozesskette auf, die sich gegenüber einer Variante, die Prepregmaterialien zu Spanten verarbeitet, aus beschleunigten Einzelprozessen im Preforming und im RTM-Verfahren zusammensetzt und die damit die Belegungszeiten auf kostenintensiven Fertigungsvorrichtungen deutlich reduziert. Hierdurch können größere Stückzahlen bei verringerten Einzelstückkosten erreicht und zudem der Energieaufwand bei der Herstellung reduziert werden.

Abstract

Future aircraft programmes, consisting of a significant share of carbon fibre reinforced plastics (CFRP) structures in weight desire CFRP frames in production rates of hundreds of kilometers per year. As automated processes are well established for metallic profiles, the manufacturing of CFRP profiles – especially with curvature, varying and/or complex integral cross sections, is still done manually. The paper gives a comprehensive view on a new process chain with accelerated preforming and curing processes in comparison to conventional preform and RTM techniques. Applying these new technologies large part numbers are achievable at lower product cost and lower energy consumption whilst the processing.

1 Einleitung

Zukünftige Flugzeugprogramme werden einen zunehmend großen Anteil von Primärstrukturen aus Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) aufweisen. Schon in aktuellen Programmen wie bei der Boeing 787 und der Airbus A 350 XWB haben CFK-Bauteile einen Gewichtsanteil von über 50% in den Strukturen (vgl. Abbildung 1).

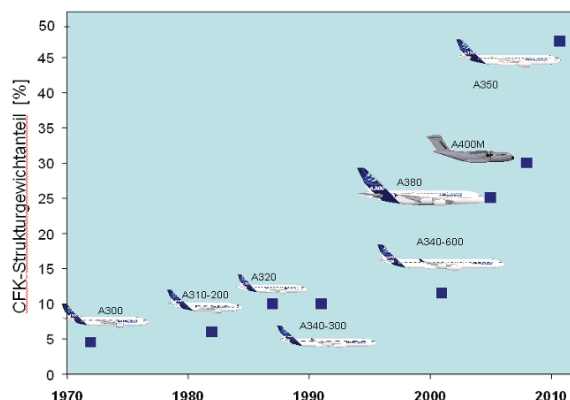


Abb. 1: Wachsender Anteil von CFK-Strukturen in aktuellen Flugzeugen (Quelle: Airbus)

Die Bauweise des Rumpfes dieser Flugzeuge orientiert sich an den metallischen differenziellen Konstruktionen von Flugzeugtypen, die sich seit Jahrzehnten erfolgreich im Linieneinsatz bewährt haben. Eine klassische Bauweise besteht aus dünnen Schalen, die mit Stringern in Längsrichtung und Spanten in Querrichtung versteift sind. Die Anbindung der Spante an die Haut erfolgt über umgeformte Schubbleche, sog. Clips oder Cleats. Die Clips erlauben innerhalb zulässiger Grenzen einen Toleranzausgleich zwischen Spant und Schale während der Montage, in dem die Clips nach Vermessung der Spant-Schalen-Abstände vor Ort in der Montage aufgebohrt und genietet werden können. Ein angepasster Toleranzausgleich ist erforderlich, da Bauteile, die aus Prepregmaterialien in einseitigen Werkzeugen im Autoklavverfahren gefertigt werden, höhere Fertigungstoleranzen aufweisen, als sie von metallischen Bauteilen bekannt sind. Ein Verkleben der Clips mit Schale und Spant ist derzeit wegen der fehlenden Kompatibilität der Matrixsysteme

von Clip und Spant nicht möglich, so dass keine ausreichende Adhäsion erzielt werden kann.

Die Montage der Teile führt durch den manuellen Aufwand zu hohen Kosten und behindern eine schnelle Taktung. Durch das komplette Durchnieten der Clips werden diese in ihrer Ermüdungsfestigkeit durch Kerbspannungen an den Nietbohrungen erheblich geschwächt. Um Spannungsspitzen zu reduzieren, sind die Bauteildicken erhöht, was zu einem höheren Strukturgewicht beiträgt.

Werden die Einzelteile bereits während der Fertigung zu integralen Bauteilen vereint, können die Montagekosten reduziert und Ermüdungsfestigkeiten erhöht werden. Werden solche integralen Bauteile, die die Funktion von Spant und Clip verbinden, in einem geschlossenen Harzinjektionsverfahren (RTM-Prozess) gefertigt, können zudem hohe Produktqualitäten bei hoher Reproduzierbarkeit erreicht werden, wodurch der Bedarf an Toleranzausgleich während der Montage reduziert ist.

Ein Bauteil dieser Art ist ein integraler Spant, z.B. mit sog. LCF-Querschnitt, der einen Fuß (Untergurt) aufweist, der direkt mit der Schale montiert werden kann. Ein künftiger CFK-Rumpf erfordert CFK-Spante in einer Größenordnung von mehreren hundert Kilometern pro Jahr. Während für metallische integrale Profile bereits automatisierte Fertigungsverfahren etabliert sind, werden CFK-Profile, insbesondere wenn sie gekrümmt sind, Querschnittsänderungen oder komplexe integrale Geometrien aufweisen, noch manuell gefertigt. Derzeitige Ansätze in der CFK-Produktionstechnologie für Spante und Stringer in Stückzahlen, wie sie in Nachfolgenerationen von Single-Aisle-Flugzeugen benötigt werden, erreichen noch nicht wettbewerbsfähige Kosten und Durchlaufzeiten zu vergleichbaren Aluminium-Profilen.

Zusammengefasst ergeben sich folgende Anforderungen an einen integralen CFK-Spant (im Vergleich zu Spanten, die in Prepreg-Autoklavverfahren hergestellt werden):

- Beschleunigte Fertigung
- Reduzierung der Fertigungskosten
- Höhere Bauteilqualität (insbesondere Verringerung der Fertigungstoleranzen) und Reproduzierbarkeit
- Reduzierung der Montagekosten
- Verwendung günstigerer Materialien

Der Vortrag zeigt eine Prozesskette auf, die sich gegenüber einer Variante, die Prepregmaterialien zu Spanten verarbeitet, aus beschleunigten Einzelprozessen im Preforming und im Aushärteverfahren zusammensetzt und damit die Belegungszeiten auf kostenintensiven Fertigungsvorrichtungen deutlich reduziert. Hierdurch können größere Stückzahlen bei verringerten Einzelstückkosten erreicht und zudem der Energieaufwand bei der Herstellung reduziert werden. Es werden die durchgeführten Fertigungsversuche und die erzielten Bauteileigenschaften dargestellt sowie ein neues Werkzeugkonzept für die beschleunigte Aushärtung im RTM-Verfahren präsentiert.

2 Fertigungstechnologien für CFK-Spante

Spante werden in Flugzeugstrukturen zur Querversteifung in Rumpfschalen eingesetzt. Sie müssen bei einer möglichen Notlandung hohen Kräften widerstehen und sind deshalb als hoch belastbare Strukturen ausgelegt. Die Spante sind entweder als einfache C- oder Z-Profile ausgeführt, die über Schubleche (Clips) mit der Haut verbunden werden, wodurch in der Montage ein Toleranzausgleich möglich ist, oder sie sind als komplexe integrale Spante mit LCF-Querschnitt gefertigt, die einen reduzierten Montageaufwand bedeuten, aber sehr hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit stellen. Spante sind mit der Rumpfhaut gekrümmt. Bei einem konventionellen Single-Aisle-Rumpf weist die Krümmung einen Radius von ca. 2000 mm auf.

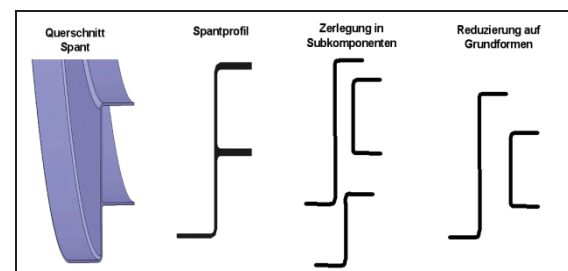


Abb. 2: LCF-Spant und Zerlegung in Subpreforms

Wird ein integraler CFK-Spant mit einer Krümmung von 2 m Radius und mit LCF-Querschnitt aus trockenen Kohlenstoffasertextilien (Multi-Axial-Gelegen) gefertigt, so kann der komplexe Preform aus einfacheren Subkomponenten (z. B. verschiedene Z- und C-Preforms) gefügt werden (Abbildung 2).

Da ein großer Teil der Wertschöpfung bei der Produktion von CFK-Komponenten in dem Preforming textiler Halbzeuge sowie in der Injektion/Aushärtung liegt, ist ein Schwerpunkt auf den Nachweis einer kontinuierlichen Produktion der Preforms und der anschließenden Aushärtung gelegt worden.

In verschiedenen Forschungsprojekten [HER 2007, SUN 2008] wurde bereits gezeigt, dass in einem hoch automatischen Prozess aus trockenen textilen Materialien LCF-Preforms schnell und kostengünstig im RTM-Verfahren zu ausgehärteten CFK-Spanten gefertigt werden können. Die Serienanwendung ist bislang noch nicht erfolgt, da validierte automatisierbare Verfahren, die die in den bisherigen Versuchen angewendeten manuellen Arbeitsschritte nachempfinden sollen, fehlen. Die Umsetzung in automatisierten Prozessen ist wegen der sehr hohen Investitionskosten bislang gescheitert.

Das Teilprojekt 3D-Profil im LuFo IV-Forschungsvorhaben LOKOST hat daher die Erfahrungen zur Drapierbarkeit von Halbzeugen genutzt, um kontinuierliche Preformverfahren zu entwickeln, die auf einfachen aber flexiblen Ablege- und Umformmodulen in einer kontinuierlichen Anlage beruhen und hierdurch Investitionskosten reduziert sind. In diesem Projekt werden Technologien erarbeitet, die nachweisen, dass Preforms für einen LCF-Spant in kontinuierlichen Verfahren schnell und prozesssicher gefertigt werden können. Hierfür wurden zwei alternative Verfahren entwickelt:

- Preforming durch kontinuierliche Umformverfahren
- Flecht-Wickel-Verfahren

Im Folgenden wird im Detail das Flecht-Wickel-Verfahren dargestellt.



Abb. 3: Flecht-Wickel-Verfahren für Spantpreforms

3 Prozesskette Preforming

Ausgehend von trockenen Faserbündeln aus Kohlenstofffasern, sog. Rovings werden Werkzeugkerne im Flecht-Wickel-Verfahren umflochten (Abbildung 3). In der Prozesskette nimmt das Preforming einen bedeutenden Anteil ein. Neben dem eigentlichen Flecht-Wickeln sind weitere Prozessschritte wie das Auftrennen des Untergurts sowie das Umklappen des Untergurts im Preforming zu berücksichtigen.

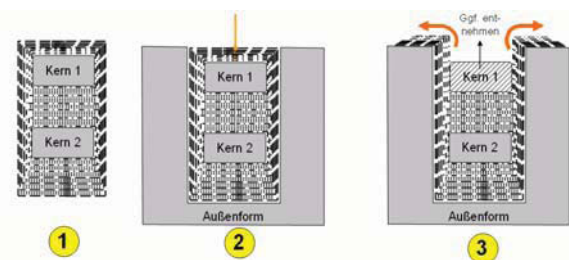


Abb. 4: Preforming in drei Schritten: Umflechten von Werkzeugkernen (1), Transfer in Aushärtevorrichtung und Auftrennen des späteren Untergurts (2), Umklappen des Untergurts (3)

Am Beispiel des LCF-Spantprofils mit einem Radius von 2 m wird die Prozesskette für die Flecht-Wickel-Variante erarbeitet. Kerngedanke ist dabei das Umflechten/Umwickeln von zwei Werkzeugkernen zu einem Preform-Kernepaket (Abbildung 4). Das Paket wird in die Vorrichtung für die Infusion und Aushärtung gebracht wird. Das umflochtene Kernepaket (Schritt 1) wird in eine Außenform transferiert, der Preform am späteren Untergurt aufgetrennt (Schritt 2) und die beiden offenen Lagenpakete jeweils um 180° umdrapiert (Schritt 3), so dass zwei identische Preforms für LCF-Spante entstehen.

In dem Spant sind mehrere Lagen mit $\pm 45^\circ$ -Orientierungen im Steg und in den Gurten sowie Lagen mit 0° -Orientierungen im Ober- und Mittelgurt vorgesehen. Folgende Materialien kommen für die jeweiligen Orientierungen zum Einsatz:

- | | |
|------------|---|
| 45°-Lagen: | UD-Wickel-Geflecht aus Carbonfasern Tenax HTS 5631, f12000, 800 tex und Grilon-Haltefäden k85 dtex235 |
| 0°-Lagen: | Integration und Fixierung von bebinderten 0°-Textilien (UD-Gelege G1157 und UD-Gelege von SGL Carbon) |

Zusätzlich sind in den Zwickelbereichen Faserrovingbündel oder Flechtkordeln zu integrieren.

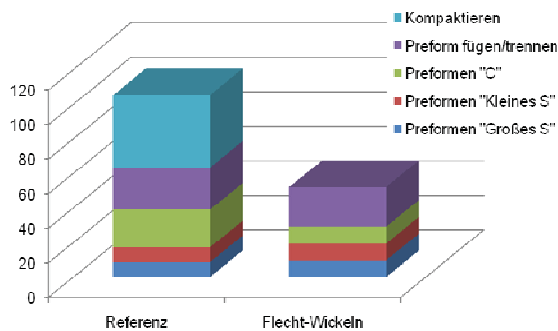


Abb. 5: 50 % Reduzierung der Durchlaufzeiten beim Preformen durch Flecht-Wickeln gegenüber der Referenz

Bei einer hohen Flechtgeschwindigkeit und einer Vorschubgeschwindigkeit von 75 m/h ist eine Flechtanlage in der Lage, die Preforms für ca. 20.000 Spante im Jahr bereitzustellen. Die Lagen mit der 0°-Orientierung werden automatisiert auf den Flecht-Wickel-Kernen abgerollt und fixiert. Da die geflochtenen Lagen unter definierter Fadenspannung auf dem Kern abgelegt werden, wird eine gleichmäßige Bedeckung und Flächenpressung der Rovings sichergestellt, so dass auf einen zusätzlichen Kompaktierungsschritt verzichtet werden kann. Das gesamte Preforming kann durch die genannten Flecht- und Drapierschnitte innerhalb von 52 Minuten realisiert werden, was einer Reduzierung von über 50 % gegenüber einer Prozesskette aus automatisierten, aber getakteten, d.h. seriellen Preformschritten („step-by-step“) entspricht (vergl. Abbildung 5).

4 Prozesskette Imprägnierung/Aushärtung

Um komplett ausgehärtete CFK-Spante zu erhalten, sind die Preforms mit einer niedrig viskosen Epoxidharzmatrix zu imprägnieren und die Bauteile auszuhärten. Für erste Fertigungsversuche wurden in einem vereinfachten Werkzeugkonzept Spante im Vakuuminfusionsverfahren hergestellt (Abbildung 6).

Die Spante wurden mit dem Epoxidharz RTM6 getränkt und unter Temperatur ausgehärtet. Die ausgehärteten Bauteile wurden in

Bauteildicke und Faservolumengehalt analysiert. Die Spante konnten porenarm imprägniert werden bei einem Faservolumengehalt von 60% in den Steg- und 57% in den Gurtbereichen.



Abb. 6: Gefertigte Versuchsbauteile des CFK-Spantes mit LCF-Querschnitt

Um einen Seriennachweis für hohe Stückzahlen zu erbringen, wurde ein erweitertes Werkzeugkonzept entwickelt, das die Fertigung von Spanten im RTM-Verfahren ermöglicht. Der RTM-Prozess erlaubt hohe Produktqualitäten bei gleichzeitig hoher Reproduzierbarkeit.

Derzeit behindern hohe Werkzeugkosten und lange Belegungszeiten dieser Werkzeuge ein weiteres Wachstum im RTM-Verfahren gefertigter CFK-Strukturbauteile. In konventionellen RTM-Verfahren werden Faserhalbzeuge in eine mehrteilige mindestens zweiteilige geschlossene Werkzeugkavität positioniert und unter Druck ($p > 7 \text{ bar}$) ein niedrig viskoses Harzsystem ($\eta < 100 \text{ mPa s}$) eingespritzt. Danach wird das Werkzeug auf die Aushärtetvorrichtung möglichst gleichmäßig im Ofen oder in einer Heizpresse auf die Aushärtetemperatur des Harzsystems aufgeheizt. Bei starren metallischen Werkzeugformen mit hoher Wärmekapazität überschreiten die Aufheizzeiten - und nach der eigentlichen Aushärtung die Abkühlzeiten - die eigentliche Aushärtezeit um ein Vielfaches.

Die Aufheizung der metallischen Formen führt zudem zu einer ungleichmäßigen Erwärmung im späteren Bauteil. Während die Werkzeuge nahen Bauteilflächen früh in auf die Prozesstemperaturen gebracht werden können, verzögert sich die Erwärmung durch die schlechte Wärmeleitung quer zum Fasergeflecht und während der Aushärtung zusätzlich des sich vernetzenden Matrixsystems im Innern der Bauteile. Die Temperaturgradienten während der Aushärtung generieren Eigenspannungen, die

sich als Verzug im ausgehärteten Spant äußern.



Abb. 7: Temperiermischanlage zur beschleunigten Aufheizung/Abkühlung von Vorrichtungen im FAST-RTM-Verfahren, Gesamtansicht (oben) u. Mischanlage (unten)

Daher wird ein adaptiertes Verfahren entwickelt, in dem thermisch aktive Aushärtevorrichtungen durch eine Temperiermischanlage (Abbildung 7) schnell und gleichmäßig beheizt und abgekühlt werden können und so der RTM-Zyklus deutlich beschleunigt werden kann.

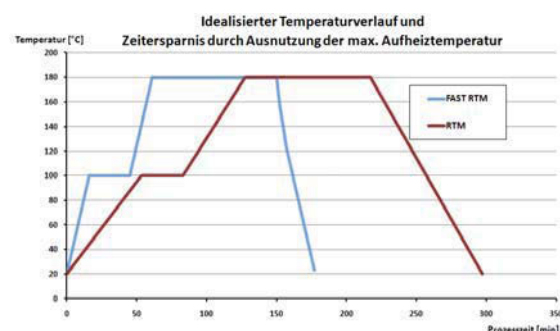


Abb. 8: Temperaturprofil eines Heiz- und Aushärtezyklus mit üblicher Aufheizgeschwindigkeit im RTM Verfahren und beschleunigter Heizung bei 5°C pro Minute im FAST RTM.

Es wird bei der Auslegung von Werkzeugen eine Aufheizrate von 5 K/min angestrebt, um die Fertigung von Bauteilen mit zugelassenen Harzsystemen zu realisieren. In konventionellen RTM-Prozessen mit Aufheizung durch Ofen oder Heizpresse wird diese Aufheizrate (und Abkühlrate) deutlich

nicht erreicht. Durch die beschriebene Temperiermischanlage und thermisch aktive Formwerkzeuge können die zulässigen Aufheizraten hingegen tatsächlich genutzt werden. Ein Vergleich mit einem Temperierprozess eines RTM Werkzeuges in einem Ofen oder einer Heizpresse zeigt die angestrebte Zykluszeitreduzierung in dieser Prozessphase (Abbildung 8).

Der FAST-RTM-Prozess beschleunigt in Kombination mit dem schnellen textilen Herstellungsverfahren des Flecht-Wickelns die gesamte Prozesskette um über 60 % auf ca. 370 Minuten (vergl. Abbildung 9). Hierdurch kann die Herstellung von CFK-Spanten signifikant kostengünstiger gestaltet werden im Vergleich zu derzeit üblichen Preform- und RTM-Verfahren. Der Kostenvorteil ergibt sich durch die deutlich reduzierten Werkzeugbelegungszeiten, da hierdurch insbesondere für große Stückzahlen die Menge der kostenintensiven Werkzeugformen aus mit Nickel legiertem Stahl (Invar®) beträchtlich reduziert werden kann.

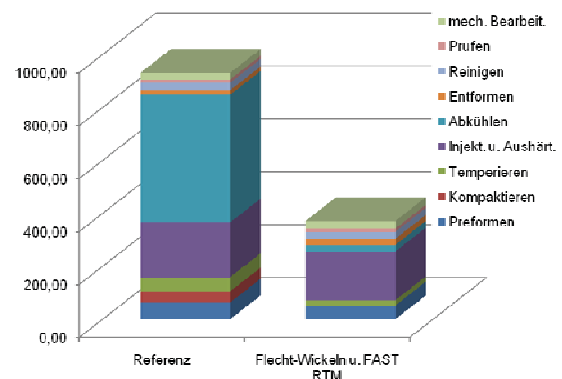


Abb. 9: 60 % Reduzierung der Durchlaufzeiten in der Prozesskette des Flecht-Wickelns mit dem FAST-RTM-Verfahren gegenüber Referenz

5 Anforderungen des Temperierprozesses

Zur Fertigung der Komponente in der geforderten Stückzahl ist eine schnelle Temperierung des Formwerkzeuges erforderlich. Insbesondere der geschlossene Bereich des Profils (um den unteren Wickelkern) muss hinsichtlich einer effizienten Temperaturübertragung kritisch betrachtet werden. Der thermische Aufheizprozess wird innerhalb der metallischen Werkzeugstruktur maßgeblich von der Wärmeleitfähigkeit und des Energieeintrags beeinflusst. Es wird eine Lösung angestrebt, mit der durch eine Öltemperierung der Energieeintrag lokal je

nach Bedarf im Werkzeug gesteuert werden kann, da sich mit dieser Technologie ein homogenes Heizverhalten im Werkzeug erreichen lässt. In der FAST-RTM-Temperieranlage stehen drei Ölkreisläufe parallel zur Verfügung, welche jeweils einen unabhängigen Heiz- und Kühlzyklus bereitstellen können. Die maximale Öltemperatur ist auf 250 °C begrenzt und in einem Volumen von 1,6 m³ bei Prozessbeginn verfügbar. Der Aufheizprozess lässt sich in vier Phasen teilen (vgl. Abbildung 10):

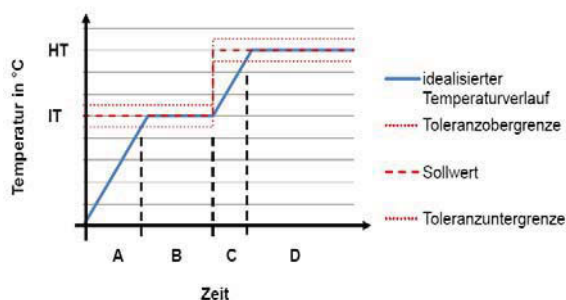


Abb. 10: Idealisierter Temperaturverlauf eines RTM-Prozesses während des Aufheizens
(IT: Injektionstemperatur, HT: Härtetemperatur)

Phase A:

Das Formwerkzeug ist geschlossen und die Kavität ist zu 60% mit dem beschriebenen trockenen Faserpreform gefüllt. Es besteht der Bedarf in möglichst kurzer Zeit den Preform und die angrenzende Kavität in den angegebenen Toleranzbereich auf Injektionstemperatur zu erwärmen. Ein lokales Überschwingen der Temperatur über die obere Toleranzgrenze kann zur Zykluszeitreduzierung toleriert werden.

Phase B:

Nachdem im Preform und den angrenzenden Werkzeugbereichen eine Temperatur innerhalb der Toleranzgrenzen erreicht ist, beginnt die Injektion des Harzsystems. Die nachfolgende Phase erfolgt, sobald die Injektion des Harzes abgeschlossen ist.

Phase C:

Um einen kurzen Fertigungszyklus zu erhalten, wird in dieser Phase im Preform ein homogenes Temperaturprofil angestrebt, so dass die maximal zulässige Heiz- und Kühlrate zu jeder Zeit gleichmäßig anliegt. Da die Kavität flüssiges und polymerisierendes Harz enthält, wird eine gleichmäßige Temperatursteigerung gefordert.

Phase D:

Die Haltedauer zur vollständigen Polymerisation wird maßgeblich durch das gewählte Harzsystem bestimmt.

Die Wärmeleitfähigkeit der HT-Kohlenstofffasern beträgt bei Raumtemperatur transversal 1,7 W/mK und longitudinal 4,9 W/mK. Zudem wird ein Näherungswert für das noch nicht ausgehärtete Harzsystem im Bereich von 120 °C bis 180 °C ermittelt. Der real temperaturabhängige Wert der Wärmeübertragung im Harzsystem beträgt im relevanten Bereich etwa 0,18 W/mK. Dieser Wert wurde zur Durchführung der Untersuchungen und Berechnung der Verbundwärmeleitfähigkeit nach der Injektion des Harzes benutzt. Als spezifische Wärmekapazität der Fasern wird $c_p = 710 \text{ J/(kgK)}$ angenommen [SUT 09].

Da die Temperaturübertragung im Preform senkrecht zur Faserrichtung vergleichsweise gering ist, ist das Temperaturprofil im Kern der Struktur von besonderer Bedeutung für den Aufheizprozess des Preforms. Infolge der isolierenden Wirkung der textilen Struktur wird der innere Kern deutlich langsamer erwärmt. Die Zykluszeit wird maßgeblich durch das Aufheizverhalten des Bereiches bestimmt, der zuletzt die untere Toleranzgrenze beider Haltephasen erreicht, wodurch die Anforderung einer Beheizung des Kernes zur Ausbildung der Hohlstruktur entsteht.

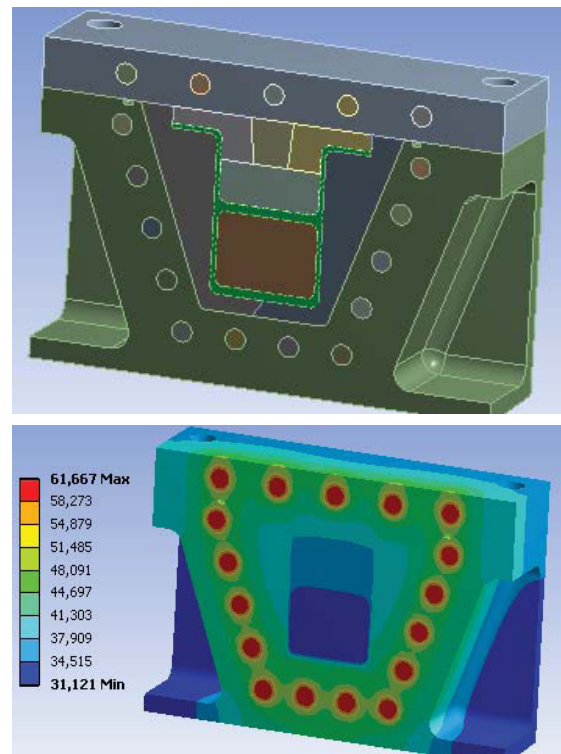


Abb. 11: Modell des Formwerkzeuges in der Schnittdarstellung (oben), Simulation des Aufheizverhaltens mit Hilfe einer Öltemperierung bei konstanter Fluidtemperatur (unten)

Abbildung 11 zeigt dazu einen vereinfachten Querschnitt des Formwerkzeuges, welches zur Herstellung von Prototypen im Rahmen der Untersuchung entwickelt wurde. In der unteren Abbildung ist dazu ein Ausschnitt des Aufheizprozesses – simuliert in Ansys dargestellt. Es wird deutlich, dass die kavitätsnahe Temperierung den äußeren Bereich um das Bauteil gleichmäßig erwärmt, innerhalb des Bereiches zwischen den Bauteilschenkeln die Temperierung verzögert durch konvektive Wärmeübertragung den Preform erreicht und im Bereich des eingeschlossenen Kernes erst eine deutlich nachgelagerte Erwärmung ermöglicht.

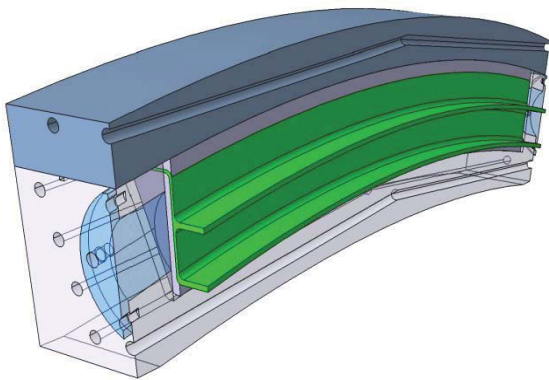


Abb. 12: Mittige Schnittansicht des Formwerkzeuges inkl. Temperierkanäle und Spant

Durch den Krümmungsradius des Bauteils, der sich auch im Werkzeugdesign wiederfindet, ist es erforderlich, dass die Temperierbohrungen mittig zusammenlaufen, wie in der Darstellung Abbildung 12 gezeigt. Daraus folgen eine höhere Wandstärke der umgebenden metallischen Form und ein ungleichmäßiger Abstand der Kanäle von der Kavität. Bedingt durch die limitierten Abmessungen des Kernelements ist bei der angestrebten Bauteillänge eine Öltemperierung auf diese Weise daher nicht zu realisieren. Zudem wird auf Grund einer möglichen Kontamination der Faserverbundstruktur bei Ölkontakt auf eine Öltemperierung im Inneren verzichtet.

6 Verwendung verloreener Kerne

Auf Grund der beschriebenen Problematik des gleichmäßigen Erwärmens sowohl der Außenformen als auch der Werkzeugkerne wird eine Lösung angestrebt, bei der eine Prozesskette mit einem kostengünstigen Kern

den Flecht-Wickel-Prozess ermöglicht und eine gleichmäßigere Erwärmung erlaubt. Es wird daher ein Fertigungskonzept untersucht, bei der ein verloreener Kern aus einem wasserlöslichem Material hergestellt, versiegelt und anschließend mit Fasermaterial umflochten wird.

Anhand eines vergleichbaren RTM-Werkzeuges für ein integrales CFK-Bauteil, des sog. Vielholmers, bei dem ebenfalls eine Öltemperierung der äußeren Formwerkzeugteile integriert wurde, konnte die Auswirkung einer Substitution metallischer Kerne mit verlorenen Kernen hinsichtlich des thermischen Verhaltens dargestellt werden. Die verlorenen Kerne bestehen aus einer porösen Struktur und verfügen daher in der Regel über eine geringe Wärmeleitfähigkeit. In beiden Fällen wird von einer Temperierung des Formwerkzeuges durch die angegebenen Ölkanäle durchgeführt, neben dem mittleren Kern befinden sich in beiden Fällen zwei metallische Kerne, die ebenfalls durch die Öltemperierung erwärmt werden.

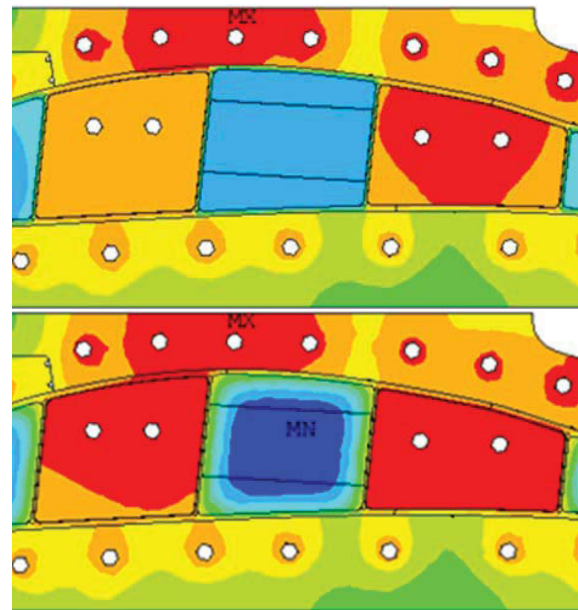


Abb. 13: Analyse des Aufheizprozesses zur Fertigung einer Vielholmerstruktur: mit metallischem Kern im mittleren Bereich (oben), mit verlorenem Kern aus porösem Material (unten)

Die Wärmeleitfähigkeit des ausspülbaren Kernmaterials liegt bei 0,16 W/(mK). Dabei wird ein Abfluss der thermischen Energie in das Innere des mittleren Kernes, wie bei der Verwendung von metallischen Kernen, weitestgehend unterdrückt (vgl. Abbildung 13). In diesem Fall wird eine gezielte Inhomogenität der Temperaturverteilung im Werkzeug erzeugt, welche zu einer gleichmäßigeren

Temperaturverteilung im Preform führt. Die Aufheizgeschwindigkeit des Bauteils im Werkzeug konnte dadurch erheblich verbessert werden.

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung verlorener Kernmaterialien den Aufheizprozess des Preforms gegenüber einer Alternative mit metallischen Kernen zusätzlich um weitere 25 % beschleunigt.

7 Aktive Beheizung verlorener Kerne

Es wird darüber hinaus eine aktive Beheizung verlorenen Kernmaterials entwickelt. Dazu wird der verlorene Kern in einem Schichtverbund aufgebaut. Die innere Schicht besteht aus einem löslichen Kernmaterial, welches aus einem keramischen Grundmaterial gefüllt mit Glashohlkugeln aufgebaut ist. Dadurch wird zum einen ein geringes Materialgewicht von etwa $0,5 \text{ g/cm}^3$ erreicht und zudem eine sehr geringe Wärmeleitung und spezifische Wärmekapazität erzeugt, die in der beschriebenen Art für die Prozessführung positiv genutzt werden kann. Mit einem chemischen Binder wird der Kern in einem Ofen gebacken, so dass aus dem pulverförmigen Ausgangsmaterial ein fester und handhabbarer Kern wird. In einem zweiten Schritt wird Kernmaterial mit einer elektrisch leitfähigen Komponente angereichert und gleichmäßig um den ersten Kern im Ofen verfestigt. Die äußere Schicht ermöglicht nun eine elektrische Beheizung, so dass die Kontaktfläche definiert mit dem C-Faserpreform erwärmt werden kann. Eine elektrische Isolierung der beheizten Kernschicht erfolgt in einem Schritt mit der erforderlichen Versiegelung des Kernes zum Schutz vor eintretendem Harz. Dies wird in der Regel durch das Einschweißen in eine Polyamid-Folie oder durch den Auftrag einer flüssigen Versiegelung gehandhabt.

Der Aufbau des Kernes in zwei Schichten führt zu einer Temperierphilosophie, die sich grundsätzlich von dem homogenen Beheizen metallischer Werkzeuge und Kerne unterscheidet. Der Schichtaufbau des Kernes ermöglicht eine geringe Wärmeleitfähigkeit des inneren Kernes und ermöglicht eine gezielte Erwärmung der bauteilnahen Schicht. Durch eine gezielte Variation der Schichtstärke elektrisch leitfähigen Materials und einer lokalen Variation der elektrisch leitfähigen Komponente kann der Kern an den lokalen Heizbedarf des Werkzeuges und

Faserverbundbauteiles angepasst werden. Hierdurch wird die homogene Temperierung komplex gestalteter Hohlprofile möglich. Zudem kann das Kernmaterial sehr schnell aufgeheizt werden, da die spezifische Wärmekapazität des Materials gering ist.

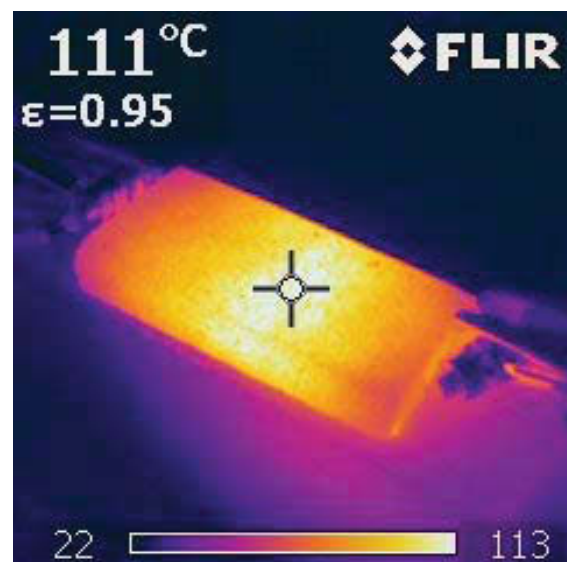


Abb. 14: Löslicher Kern mit einer gezielt eingestellten elektrischen Leitfähigkeit im äußeren Bereich zur Beheizung – die innere Struktur verfügt über eine geringe Wärmeleitfähigkeit (oben). Darstellung eines elektrisch beheizten Kernes mit einer Infrarotkamera (unten).

Untersuchungen im Labormaßstab zeigen, dass in Abhängigkeit der Stärke einer elektrisch leitfähigen Schicht am Kern innerhalb weniger Sekunden eine Temperatur oberhalb 100°C erreicht werden kann (Abbildung 14). Eine exakte Temperaturführung an der Kernoberfläche ist durch das Einstellen der elektrisch leitfähigen Schichtstärke und eine Regelung der elektrischen Spannung und Stromstärke zu realisieren. Die Laborversuche wurden mit

einer Spannung von 15 Volt durchgeführt, so dass das System gefahrlos betrieben werden kann.

Obwohl in dieser Form eine Kühlung des Kernes nicht realisiert werden kann, wird eine Reduzierung der Prozesszeit nach der Aushärtung durch ein Ausspülen des Kernmaterials oberhalb der üblichen 50 °C angestrebt. Das Entfernen des Kernmaterials mit Wasser ist auch mit integrierter Heizung ohne Einschränkungen durchzuführen.

8 Zusammenfassung

Verschiedene Innovationen führen dazu, die Prozesskette bei der Herstellung von integralen CFK-Spanen deutlich zu beschleunigen und hierdurch die Belegungszeiten auf kostenintensiven Vorrichtungen zu reduzieren.

Die Preforms werden hochautomatisiert, prozesssicher und schnell im kontinuierlichen Flecht-Wickel-Verfahren gefertigt. Nach dem Transfer in die Aushärtevorrichtung muss dieser nur noch längsseits aufgetrennt und umgeklappt werden.

Die Injektion mit einem niedrig viskosen Epoxidharzsystem und anschließende Aushärtung erfolgt im FAST-RTM-Verfahren, in dem Aufheizung und Abkühlung beschleunigt werden können.

Die Temperaturführung im RTM-Werkzeug wird bei geschlossenen Strukturen maßgeblich durch die Wärmeübertragung des Faserpreforms bestimmt. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Preforms senkrecht zur Faserrichtung bedingt zur Realisierung einer geringen Zykluszeit ein Beheizen des inneren Kernes. Die Öltemperierung ermöglicht durch den lokal regelbaren Wärmeeintrag eine exakte Temperaturführung im Werkzeug und einen schnellen Temperierprozess.

Die Verwendung verlängerter Kernmaterialien ermöglicht ein inhomogenes Heizprofil im Werkzeug, das ein schnelleres Aufheizen des Faserpreforms und der angrenzenden Bereiche ermöglicht. Zudem wird die Möglichkeit aufgezeigt, den Fertigungsprozess durch eine im Kernmaterial integrierte Heizung zu beschleunigen und die Temperaturführung dadurch homogener zu gestalten.

Mit Hilfe der genannten Innovationen ist es möglich, die gesamte Prozesskette zur Fertigung von CFK-Spanen um über 60 % zu reduzieren im Vergleich zu konventionellen Preform- und RTM-Prozessen.

Danksagung

Das Faserinstitut Bremen e.V. und die Universität Bremen bedanken sich für die Förderung durch das Nationale Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo IV), finanziert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Innovation und organisiert durch den Projektträger Luftfahrtforschung, DLR-PT Bonn, für die Förderung durch das Land Bremen mit der Unterstützung des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung, organisiert durch den wfb Bremen. Weiterer Dank gilt den Partnern SGL Kumpfers GmbH und der CTC Stade GmbH.

Literaturverzeichnis

- [HER 2007] Herrmann, A.S., Klein-Lassek, M.: *Hochautomatisierte RTM-Fertigung mit CFK*, Vortrag auf der AVK-Tagung 2008, veröffentlicht in Konferenzunterlagen, Stuttgart 2007
- [SUN 2008] Sundermann, R., Herrmann, A.S.: *Automated Production of complex CFRP Components*, Vortrag auf der 13. ECCM 2008, veröffentlicht in Conference Proceedings, Stockholm (SWE), Mai 2008
- [SUT 2009] Suter-Kunststoffe AG: *Carbon-(Kohlenstoff-Fasern) Fasertabelle. Torayca-Fasern. Tenax-Fasern. Mitsubishi-Fasern*. Online im Internet: <http://www.swiss-composite.ch/pdf/i-Carbon-Fasertabelle.pdf> [Stand: 17.12.2009]